

X線回析法による二相ステンレス鋼の応用測定に関する研究

著者	廣瀬 元
号	2071
発行年	2003
URL	http://hdl.handle.net/10097/10878

氏 名	ひろ せ はじめ 廣 瀬 元
授 与 学 位	博士 (工学)
学 位 授 与 年 月 日	平成15年7月9日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最 終 学 歴	平成9年8月 オハイオ州立大学大学院工学研究科機械工学専攻博士 (後期) 課程 中退
学 位 論 文 題 目	X線回折法による二相ステンレス鋼の応力測定に関する研究
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 坂 真澄 東北大学教授 渡邊忠雄 東北大学教授 井上克己 東北大学教授 祖山 均

論 文 内 容 要 旨

本論文は、X線応力測定において、従来不可能とされてきた塑性ひずみの評価を扱い、多相材料に適用されるマイクロメカニクス理論を用いることによりそれを可能にしたものである。実用上重要な多相材料である $(\alpha + \gamma)$ 二相ステンレス鋼を対象として、実験的かつ実用的な側面からその検証を行った。従来のX線応力測定法は、弾性学を基礎とした測定理論であるため、弾性変形域を越えた塑性変形に関しては、定量的な解析が原理上不可能であった。それに対して多相材料の応力状態を解析する場合、本論文の手法を用いることにより、弾性変形の応力状態のみならず、従来の方法と同様な手順で塑性変形の解析が行えることを明らかにし、実用材への応用を可能にした。加えてイメージングプレート (IP) を用いた応用技術として従来までの $\sin^2\psi$ 法から、 α 角基準法である $\cos\alpha$ 法を用いて応力測定を行い、迅速かつ装置の省力化を推進させる基礎的検討を行い、その可能性を明らかにした。

本論文の内容は、次のように2つに大別される。

第1に、二相ステンレス鋼を対象として、従来のX線応力測定法に加えて、新しくマイクロメカニクス理論を導入し、塑性ひずみのミスフィット $\Delta\epsilon^p$ に関する新しい測定および解析方法を提案し、引張変形挙動に関してそれを実験的に検証した。その応用として、二相ステンレス鋼に対して塑性変形を与え、本応力解析法を適用して弾塑性変形挙動を新しいX線応力測定を基本に検討した。具体的には塑性ひずみのミスフィットなる新しいX線パラメータを用いて、研削加工時の弾性、塑性ひずみの両観点からの応力状態の把握、表面にショットピーニング加工を行った際の、加工誘起マルテンサイト変態を含めた微視的応力状態の検討、ならびに疲労破面に対するX線フラクトグラフィを行った。

第2にX線応力測定法の新たな可能性として、IPを用いた二相ステンレス鋼の応力解析を提案した。具体的には、IPの特長である測定時間の短縮を目的とした応力解析実験、ならびにコンピュータトモグラフィ (CT) 法を用いた微視的な残留応力分布の測定、結晶異方性を持つ二相ステンレス

鋼の結晶状態把握のための IP を用いた迅速な極点図測定法の開発を行った。

本論文の内容の要約を以下に記述する。

第1章 序論

X線応力測定の実史および現状での多相材評価においての問題点を整理し、本研究の目的および構成を述べた。

第2章 二相ステンレス鋼のX線応力測定法

X線応力測定法を進展させ、2相材料の変形挙動の解明に有用な微視的応力状態の測定方法について検討した。まず従来からの弾性論を基礎に導かれたX線応力測定法に対し、基礎理論にマイクロメカニクス理論を組み入れることでX線によるひずみと応力、塑性ひずみのミスフィットなどとの間の関係を導いた。塑性ひずみの評価に対して、従来の回折図形の形状変化、特に半価幅変化を利用した定性的な評価法から、本方法を用いることによって、応力と同様に塑性ひずみのミスフィットを定量的に測定することを可能にした。

また引張塑性ひずみを与えた二相ステンレス鋼について本方法を適用した場合、引張塑性ひずみが0である試験片を用い、測定した相応力と負荷応力との関係は、第2相を球形として導いたマイクロメカニクス理論による予測とよく一致し、塑性ひずみのミスフィットに関する本定量的測定手法の適用が有効であることを確認した。さらに塑性ひずみを与えた試験片における残留応力および塑性ひずみを測定し、巨視的な負荷塑性ひずみとの関係を明らかにした。

第3章 二相ステンレス鋼の研削加工層におけるマクロ・マイクロ残留応力測定

二相ステンレス鋼に上向きおよび下向き研削を行い、研削時の切り込み量を、数種類変えた際の材料表面および内部について、両相の相応力、マクロ応力、マイクロ応力、塑性ひずみのミスフィットなどについて検討した。

残留応力に関して、上向きおよび下向きの研削共に α Fe、 γ Fe 両相の深さ方向への残留応力を測定した結果、本実験範囲において、表面近傍では α Fe 相の方が常に大きな引張残留応力値をとる。ただし絶対値については、いずれの切り込み量においても、下向き研削の応力値が大きくなっていることを明らかにした。加えて α Fe 相と γ Fe 相の深さ方向に関する残留応力分布を、切り込み量別にそれぞれ比較した場合、 α Fe 相では切り込み量の増加と共に、より深い部分まで研削残留応力が形成されている。これに対して γ Fe 相では α Fe 相に比べて浅い位置で応力値は一定値に収束し、また切り込み量を変化させても、 γ Fe 相の応力収束位置はほとんど変化しない。このことは上向き、下向き研削いずれについても同様である。

また塑性ひずみに関して、上向きおよび下向き研削共に両相の半価幅は、切り込み量によってほとんど変化しない。また α Fe 相の方が表面付近で γ Fe 相よりわずかに大きな半価幅比をとる。さらに γ Fe 相における半価幅の深さ方向の分布は γ Fe 相の相応力のそれと類似したものである。

残留応力と塑性ひずみのミスフィットとの相関に関して、両相の相応力の差に対して、マクロ応力が関与する項 f_{σ} と塑性ひずみのミスフィットが関与する項 f_{ϵ} を比較した場合、 f_{ϵ} の挙動が支配的

である。また塑性ひずみが存在するような引張の残留応力を有する場合、負荷応力の増加量に対して、相応力の変化量は小さくなる。したがって両相の塑性ひずみのミスフィットは、残留応力挙動と密接に関係していることが明らかとなった。

第4章 二相ステンレス鋼へのX線フラクトグラフィの適用

二相ステンレス鋼に対し、X線フラクトグラフィの手法を適用して、破面および破面下の塑性ひずみのミスフィット、マクロ、ミクロ応力、相応力などのX線におけるパラメータと破面形成時の応力拡大係数範囲 ΔK などの破壊力学パラメータとの相関を明らかにした。また疲労き裂近傍の残留応力分布に関しても検討を行い、各種X線パラメータを基にした測定結果を比較すると共に、従来の報告と合わせて検討を加えた。

破面下の相応力分布は、 α Fe 相、 γ Fe 相共に破面から深くなるに従い引張残留応力が上昇し、ピークを示した後、減少に転じ、その後一定値に収束する。また α Fe 相における残留応力のピーク位置は、 ΔK が大きくなるに従い深い領域に移動する。

破面下での $\Delta \varepsilon^P$ 分布の収束位置から求めた塑性域深さ ω_y と最大応力拡大係数 K_{\max} との間には以下の関係が成立した。

$$\omega_y = \alpha \left(\frac{K_{\max}}{\sigma_{0.2}} \right)^2$$

ここで $\sigma_{0.2}$ は二相ステンレス鋼の 0.2%耐力、 α は定数である。マクロ応力の分布および $\Delta \varepsilon^P$ 分布から求めた本研究に供した二相ステンレス鋼の α の値はほぼ 0.15 であり、Levy らの有限要素法を用いた解析での値とほぼ一致した。

本研究において、新たにマクロ応力の分布および $\Delta \varepsilon^P$ 分布から ω_y を推定する方法を提案した。この方法を用いれば、相応力のような各相毎の $\sigma_{0.2}$ を考えなくてもよいため取り扱いが簡単であり、多相材の全体を扱うパラメータとしては有効であると考えられる。

第5章 二相ステンレス鋼のショットピーニング加工の疲労強度への影響

二相ステンレス鋼にショットピーニング加工を施し、回転曲げ疲労試験を行い、加工材の疲労強度向上に影響を及ぼす因子を明らかにするために、残留応力、硬さおよび組織変化を詳細に調査した。

二相ステンレス鋼の表面には加工誘起マルテンサイトが形成されており、深さ約 120 μ m までに加工硬化層および γ Fe 相の加工誘起マルテンサイト変態による組織変態層が存在した。疲労限度に関しては約 10%向上した。圧縮残留応力は、 α Fe 相、 γ Fe 相共に疲労限度程度の負荷を与えた場合、繰返し試験開始後の初期過程でほとんど解放した。その結果より、当該ショットピーニング処理条件では疲労強度向上に対して残留応力の影響は小さいことがわかった。

半価幅および塑性ひずみのミスフィットの変化より、第 2 種応力、第 3 種応力を分離することができた。その結果、二相ステンレス鋼はショットピーニング加工による第 3 種応力のみの影響を受けていることがわかった。また体積率の変化よりマルテンサイト変態が確認された。これより二相ステンレスのショットピーニング加工による硬度上昇は加工硬化と相変態に影響されることが明らかとなった。特に加工硬化が大きく起因していることが確認され、その主な要因は α Fe および γ Fe 両

相自体の硬化であり、主に α Fe相に強く依存している。そして二相ステンレス鋼における γ Fe相の加工硬化は、相変態および組織の微細化によるものである。さらに α Fe相の加工硬化も相自体の微細化による硬化であることが明らかとなった。

第6章 IPによる二相ステンレス鋼のX線応力測定

IPによって回折像を計測する α 角基準法を二相ステンレス鋼の研削加工の解析に適用し、本手法の検証を行い、さらにCT理論によって2次元残留応力分布を求める方法について検討を行った。

IPを用いると測定時間が大幅に短縮する。従来の $\sin^2\psi$ 法では、材料の構成相毎の回折データを測定する必要があるが、本方法のIPにおいては、各相の回折像を1個の検出器上に同時に記録することができ、また回折像から3軸応力成分のすべてを同時に測定できるので、測定効率が向上する。

またCT理論による残留応力分布の測定を行い、従来の $\sin^2\psi$ 法との比較検討から、本測定法が非常に有効であることを確認した。 γ Fe相の結晶粒径が $10\sim 200\mu\text{m}$ なる切欠きのある二相ステンレス鋼の引張変形後（降伏応力まで引張後除荷したもの）の塑性域の大きさはRiceの弾塑性近似解とほぼ対応している。さらに粗大な結晶粒を有する材料においても、揺動距離の長さを調節できる再構成領域を用いれば、本方法によって残留応力分布の測定が可能であることを明らかにした。

第7章 IPを用いた二相ステンレス鋼の完全極点図測定および集合組織の3次元解析への適用

IPを用いて反射法のみによって完全極点図を得ることを目的とし、二相ステンレス鋼圧延板の α Feおよび γ Feの各相について完全極点図測定を行った。また得られた完全極点図の極密度データを用い、各相について集合組織の3次元解析を行った。

本法により反射法のみによる測定で、完全極点図を得ることができる。また本極点図測定法では、試料内の回折に寄与する部分の体積変化、入射および回折X線の試料内での透過距離が変わるための吸収量変化、また擬集中条件からのずれ等によって回折強度に変化が生じることはなく、回折強度の補正の必要はない。よって本法によって得られた完全極点図の極密度データを用いて、集合組織の3次元解析が可能であることが明らかとなった。

第8章 結論

本研究の総括ならびに研究の展開と方向性について述べた。

論文審査結果の要旨及び学力確認結果の要旨

論文提出者氏名	廣 瀬 元
論 文 題 目	X線回折法による二相ステンレス鋼の応力測定に関する研究
論文審査及び 学力確認担当者	主査 教授 坂 真澄 教授 渡邊 忠雄 教授 井上 克己 教授 祖山 均

論文審査結果の要旨

従来のX線応力測定法では、弾性変形域でのひずみおよび応力を求めることは可能であるが、塑性ひずみ量を求めることは困難とされてきた。

著者は、引張強さ、硬さおよび耐腐食性に優れた特徴を持つ ($\alpha+\gamma$) 二相ステンレス鋼を対象として、結晶構造の異なる α Fe 相と γ Fe 相間の相互作用を考慮し、その関係をX線応力測定法に適用することで、従来までと同様な手順で弾性域に加え塑性域の解析をも可能にした。これを踏まえ、二相ステンレス鋼における曲げ、引張変形および研削、ショット加工に対する塑性ひずみの定量的評価に成功し、またX線フラクトグラフィにおいて本測定法の有用性を確認した。加えてイメージングプレート (IP) を用いた応力測定を行い、迅速化かつ測定の手簡略化の可能性を明らかにした。本論文はこれらの開発についてまとめたものであり、全編8章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、二相間の相互作用を考慮し、塑性ひずみのミスフィットというパラメータを導入した新しいX線応力測定法を提案し、同測定法の有効性を明らかにしている。これは工学上有益な成果である。

第3章では、二相ステンレス鋼に研削加工を施し、新たに提案のX線応力測定法を用いてその変形挙動を弾性および塑性変形の両面から観察している。切り込み量や研削方向などの研削条件を変化させ、引張残留応力が小さくなる最適な研削条件を考察する指針を与えている。これは研削加工を対象とした重要な成果である。

第4章では、X線フラクトグラフィに本X線応力測定法を利用して、従来に比べより不確かさの少ない破面解析法を開発している。塑性ひずみのミスフィットが明確な収束位置を示すことを明らかにし、これを用いて塑性域深さを推定するという有効な技術を開発している。

第5章では、二相ステンレス鋼にショットピーニング加工を加えた材料に疲労試験を施し、本X線応力測定法を利用して疲労強度向上の原因を推定し、その後、動的微小硬さ試験により加工硬化がその主たる原因であることを明らかにしている。これは当該加工において有用な知見である。

第6章では、医療現場等で用いられる IP を本X線応力測定に適用し、第3章において実施した測定が短時間でできることを示している。またコンピュータトモグラフィの手法を応力測定に導入し、切欠きを持つ試験片での応力集中の様子を従来法より短時間で解析している。これらは工学的に有用な成果である。

第7章では、IP を用いて、反射法のみで完全極点図を簡便に測定する方法を開発している。これは有益な成果である。

第8章は結論である。

以上要するに本論文は、二相材料を対象として塑性ひずみの評価を可能にする新しいX線応力測定法を開発し、その有効性を ($\alpha+\gamma$) 二相ステンレス鋼で実証したものであり、機械知能工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として合格と認める。

学力確認結果の要旨

平成15年4月11日、審査委員ならびに関係教官出席のもとに、学力確認のための試問を行った結果、本人は機械知能工学に関する十分な学力と研究指導能力を有することを確認した。

なお、英学術論文に対する理解力から見て、外国語に対する学力も十分であることを認めた。

論文審査結果の要旨

従来のX線応力測定法では、弾性変形域でのひずみおよび応力を求めることは可能であるが、塑性ひずみを求めることは困難とされてきた。

著者は、引張強さ、硬さおよび耐腐食性に優れた特徴を持つ($\alpha+\gamma$)二相ステンレス鋼を対象として、結晶構造の異なる α Fe相と γ Fe相間の相互作用を考慮し、その関係をX線応力測定法に適用することで、従来までと同様な手順で弾性域に加え塑性域の解析をも可能にした。これを踏まえ、二相ステンレス鋼における曲げ、引張変形および研削、ショット加工に対する塑性ひずみの定量的評価に成功し、またX線フラクトグラフィにおいて本測定法の有用性を確認した。加えてイメージングプレート(IP)を用いた応力測定を行い、迅速化かつ測定の手簡略化の可能性を明らかにした。本論文はこれらの開発についてまとめたものであり、全編8章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、二相間の相互作用を考慮し、塑性ひずみのミスフィットというパラメータを導入した新しいX線応力測定法を提案し、同測定法の有効性を明らかにしている。これは工学上有益な成果である。

第3章では、二相ステンレス鋼に研削加工を施し、新たに提案のX線応力測定法を用いてその変形挙動を弾性および塑性変形の両面から観察している。切り込み量や研削方向などの研削条件を変化させ、引張残留応力が小さくなる最適な研削条件を考察する指針を与えている。これは研削加工を対象とした重要な成果である。

第4章では、X線フラクトグラフィに本X線応力測定法を利用して、従来に比べより不確かさの少ない破面解析法を開発している。塑性ひずみのミスフィットが明確な収束位置を示すことを明らかにし、これを用いて塑性域深さを推定するという有効な技術を開発している。

第5章では、二相ステンレス鋼にショットピーニング加工を加えた材料に疲労試験を施し、本X線応力測定法を利用して疲労強度向上の原因を推定し、その後、動的微小硬さ試験により加工硬化がその主たる原因であることを明らかにしている。これは当該加工において有用な知見である。

第6章では、医療現場等で用いられるIPを本X線応力測定に適用し、第3章において実施した測定が短時間でできることを示している。またコンピュータトモグラフィの手法を応力測定に導入し、切欠きを持つ試験片での応力集中の様子を従来法より短時間で解析している。これらは工学的に有用な成果である。

第7章では、IPを用いて、反射法のみで完全極点図を簡便に測定する方法を開発している。これは有益な成果である。

第8章は結論である。

以上要するに本論文は、二相材料を対象として塑性ひずみの評価を可能にする新しいX線応力測定法を開発し、その有効性を($\alpha+\gamma$)二相ステンレス鋼で実証したものであり、機械知能工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。